12 月 December
2020, 63(12): 1482 – 1489
昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA
http://www.insect.org.cn
doi: 10.16380/j.kcxb.2020.12.006

东方绢金龟雌成虫对桃树挥发物的触角电位和行为反应

张萌萌[1,2,3], 陈宏灏[1], 王文凯[2,*], 陈 立[3,4,*]

(1. 宁夏农林科学院植物保护研究所, 银川 750002; 2. 长江大学农学院, 湖北荆州 434000; 3. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101; 4. 河北大学生命科学学院, 生命科学与绿色发展研究院, 河北保定 071002)

摘要:【目的】东方绢金龟 *Maladera orientalis* 是我国重要的园林植物害虫。本研究通过鉴定对东方绢金龟具有引诱作用的桃树挥发物成分,为植物源引诱剂的开发奠定基础。【方法】利用顶空吸附法收集桃树枝叶挥发物,使用气质联用(GC-MS)及气相色谱触角电位(GC-EAD)鉴定桃树挥发物中对东方绢金龟雌成虫有电生理活性的物质组分;以正己烷为对照,使用触角电位(EAG)仪和Y型嗅觉仪分别测试东方绢金龟雌成虫对鉴定出的活性物质的EAG和行为反应。【结果】从桃树挥发物中共鉴定出6种活性物质,包括反-2-己烯醛、顺-3-己烯乙酸酯、反-3-己烯醇、顺-3-己烯醇、水杨酸甲酯以及1种未知化合物。当剂量为1和10 μg时,东方绢金龟雌成虫对反-2-己烯醛的EAG反应值最大;当剂量为100 μg时,东方绢金龟雌成虫对顺-3己烯乙酸酯的EAG反应值最小。行为反应试验结果表明,东方绢金龟雌成虫对100 μg的反-3-己烯醇和顺-3-己烯醇表现出显著的趋性。【结论】桃树挥发物中的反-3-己烯醇和顺-3-己烯醇对东方绢金龟雌成虫有显著的吸引作用。

关键词: 东方绢金龟; 桃树挥发物; 行为反应; GC-EAD; 触角电位; Y型嗅觉仪
中图分类号: Q968　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 0454-6296(2020)12-1482-08

Electroantennographic and behavioral responses of female adults of *Maladera orientalis* (Coleoptera: Scarabaeidae) to peach tree volatiles

ZHANG Meng-Meng[1,2,3], CHEN Hong-Hao[1], WANG Wen-Kai[2,*], CHEN Li[3,4,*] (1. Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. School of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434000, China; 3. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Life Science, Institute of Life Science and Green Development, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract:【Aim】*Maladera orientalis* is an important garden pest in China. This study aims to identify peach tree volatile compounds attracting *M. orientalis*, so as to provide a theoretical basis for developing attractants of plant origin.【Methods】Leaf volatiles were collected from peach tree by dynamic headspace adsorption. The electrophysiologically active compounds for *M. orientalis* adults were identified from peach tree volatiles by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and coupled gas chromatography electroantennogram detection (GC-EAD) techniques. The electrophysiological and behavioral responses of female adults of *M. orientalis* to the identified active compounds were tested by using

基金项目: 宁夏植物病虫害防治重点实验室开放课题(NXDPL-02)
作者简介: 张萌萌, 女, 1996年10月生, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为化学生态学, E-mail: 1042543106@qq.com
[*] 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: chenli1@hbu.edu.cn; wwk@yangtzeu.edu.cn
收稿日期 Received: 2020-05-27; 接受日期 Accepted: 2020-07-09

electroantennography (EAG) and Y-tube olfactometer, respectively, using hexane as a control. 【Results】Six active compounds were identified from peach tree volatiles, including *E*-2-hexenal, *Z*-3-hexenyl acetate, *E*-3-hexenol, *Z*-3-hexenol, methyl salicylate and an unknown compound. *E*-2-Hexenal triggered significantly greater EAG response in female adults of *M. orientalis* than the other four compounds at the doses of 1 and 10 μg. When the dose was increased to 100 μg, *Z*-3-hexenyl acetate triggered significantly lower EAG response in female adults of *M. orientalis* than the other four compounds. In behavioral response experiments, the female adults of *M. orientalis* were significantly attracted to *E*-3-hexenol and *Z*-3-hexenol at the dose of 100 μg. 【Conclusion】Among peach tree volatile compounds, *E*-3-hexenol and *Z*-3-hexenol are significantly attractive to female adults of *M. orientalis*.

Key words: *Maladera orientalis*; peach tree volatiles; behavioral response; GC-EAD; electroantennogram; Y-tube olfactometer

东方绢金龟 *Maladera orientalis*，又名黑绒金龟、天鹅绒金龟子、东方金龟子等，属鞘翅目(Coleoptera)鳃金龟科(Scarabaeidae)，是重要的农林害虫(刘广瑞等，1997；乔志文等，2014)，主要分布于我国华北、东北和西北地区，以及朝鲜、日本和蒙古(乔志文等，2014；师二帅，2014)。东方绢金龟一年发生 1 代，以成虫在土中越冬，越冬成虫在 4 月上旬开始出土直至 6 月末，4 月末至 6 月上旬为成虫为害盛期(白文辉，1981)。该虫适应性强，食性杂，可为害 149 种植物，分属于 45 科 116 属(刘广瑞等，1997)。成虫喜食豆类、甜菜和林木、果树的嫩芽、幼苗(贺达汉等，2000；陈博和陈磊，2016)，幼虫则对农作物及苗木根系造成严重危害(韩国君等，2002)。成虫有假死性和趋光性，多在傍晚出土活动，约在 17 时出土取食，18 – 20 时数量最多(乔志文等，2014)。目前，防治东方绢金龟的主要方法包括振落捕杀、黑光灯诱杀、喷洒农药以及利用白僵菌 *Beauveria* 制剂、TS1 线虫、苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* 制剂处理土壤等(胡长林和李莉，2002；贺晓红，2004；孙瑞红等，2008；马庆州等，2009；许玉国和孙久胜，2012；周兴武和丁广州，2012)。但是这些方法存在费时费力、污染环境、靶标害虫选择性差、防治效果有限等弊端，因此探索高效、环境相容性好的防治方法是害虫治理的上策。植物源引诱剂具有省力、高效、环境安全、害虫不易产生抗性等特点(李为争等，2013；滕小慧等，2017)，有可能成为防治金龟甲类害虫的一个重要途径(龚恒亮等，2013)。

植物挥发性物质在昆虫-植物关系中起着重要的作用，寄主植物可通过自身释放的挥发性物质影响昆虫的取食与产卵行为，而植食性昆虫则能利用寄主植物和非寄主植物释放的化学物质来识别、定位寄主(Knolhoff and Heckel，2014；Sun *et al*.，2014)。例如，六月金龟 *Phyllophaga cuyabana* 偏好取食大豆，在大豆田的产卵量显著高于棉花田，说明金龟甲成虫能够利用植物挥发物选择更适宜后代生存的寄主(Oliveira *et al*.，2007)；白星花金龟 *Potosiabre vitarsis* 和小青花金龟 *Oxycetonia jucunda* 能够利用玫瑰花挥发物中的顺-3-己烯醇进行寄主定位(李仲秀等，1995；王广利和孙凡，2005)；蒲公英花挥发物中的顺-3-己烯醇乙酸酯、苯甲醛、苯乙醛、苯乙醇、苯甲酸苯酯可引起扁绿异丽金龟 *Anomala octiescostata* 的强烈趋向行为(Leal *et al*.，1994)；丙酸苯乙酯、丁子香酚和香叶醇(3∶7∶3，v/v)的混合物对日本丽金龟 *Popillia japonica* 的引诱效果最佳，已被广泛应用于诱杀与监测(Leal，1998)。

桃树是多种金龟甲的寄主植物，一株树上可有十几头甚至几十头金龟子集中取食，轻者吃成花叶，重者只残留叶脉，被为害的桃树会推迟结果甚至形成小老树以至枯死(浑志英和张之新，1992；李娅娅等，2018)。本研究根据金龟子成虫利用植物挥发物进行寄主定位的行为特点，通过动态顶空吸附法收集桃树枝叶挥发物，采用气相色谱触角电位(GC-EAD)和气质联用(GC-MS)技术鉴定挥发物中对东方绢金龟具有触角电生理活性的化学物质，并对这些物质的行为活性进行测试，期望为开发高效、环保的东方绢金龟植物源引诱剂提供重要依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料和仪器

1.1.1　供试昆虫：东方绢金龟雌成虫，采集于北京市朝阳区中国科学院奥运村园区内，用桃树叶饲养。

1.1.2　供试植物：选取北京市朝阳区中国科学院奥

运村园区内的桃树作为供试植物。

1.1.3 主要试剂与仪器：采样袋（60 cm × 80 cm, Reynolds Oven Bag, 美国）；吸附剂 Porapak Q（80 – 100 目, Supelco, 美国）；吸附管（内径 5 mm）；大气采样仪 QC-1S 型（北京市劳动保护科学研究所, 北京）；触角电位仪（Syntech, Kirchzarten, 德国）；气相色谱-质谱联用仪（7890A-5975C, Agilent Technology, 美国）；气相色谱仪（GC-2010plus, Shimaduz, 日本）。色谱纯正己烷、二氯甲烷购自上海安谱科学仪器有限公司；供试挥发性气味物质的编号、标准化合物名称、相对分子质量和纯度见表 1，均购自北京百灵威科技有限公司。

表 1 挥发物标准品的纯度和来源

Table 1 Purity and sources of volatile standards

化合物编号 Compound no.	化合物 Compounds	CAS 号 CAS no.	相对分子质量 Relative molecular weight	纯度（%） Purity
C1	反-3-己烯醇 *E*-3-Hexanol	928-97-2	100	95
C2	顺-3-己烯醇 *Z*-3-Hexanol	928-96-1	100	98
C3	反-2-己烯醛 *E*-2-Hexenal	6728-26-3	98	97
C4	顺-3-己烯乙酸酯 *Z*-3-Hexenyl acetate	3681-71-8	142	99
C5	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	119-36-8	152	98
C6	苯甲酸甲酯 Methyl benzoate	93-58-3	136	98

1.2 寄主植物桃树的选取和挥发物收集

在中国科学院奥运村园区内，选取 5 棵桃树，每棵树重复 2 次，在东方绢金龟出土高峰段（18:00 – 20:00 时）采集桃树挥发物。参考李娅娅等（2018）的动态顶空吸附法，选取等量无病害且长势良好的枝条，用采样袋将枝条套住。然后在枝条基部放入装有活性炭的玻璃管（长 20 cm，内径 5 cm），用绳子将采样袋连同枝条和玻璃管绑紧，在袋子顶端剪开一小口插入吸附管，用线绳绑紧，保证枝条完整且采样袋不漏气，用 Teflon 管依次连接吸附管的一端、气体流量计和大气采样仪进气口。吸附管装有 200 mg 的吸附剂。大气采样仪流速设定为 500 mL/min。采集时间为 2 h。采集完成后立即用浓度为 5 ng/μL的苯甲酸甲酯二氯甲烷溶液（苯甲酸甲酯为内标）洗脱吸附管，得到 0.5 mL 洗脱液置于 –20℃ 冰箱内备用。

1.3 桃树挥发物中 EAD 活性成分的鉴定

采用 Agilent 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪对收集的桃树挥发物洗脱液分别进行组分分析。色谱柱为 DB-WAX 毛细管柱（30 m × 250 μm × 0.25 μm），进样量 2 μL，无分流进样。柱温升温程序：起始温度 40℃，保持 1 min，以 5℃/min 升至 180℃，再以 10℃/min 升至 240℃，保持 4 min。溶剂延迟 5 min。进样口温度 230℃，离子源温度 250℃，质谱电离方式为 EI，电离能量为 70 eV，扫描质量范围 40 ~ 500 amu。

根据质谱数据检索 NIST08 质谱库鉴定触角电位（EAG）活性成分的结构，并用标准品配制浓度为 0.1 μg/μL 的正己烷溶液，采用上述升温程序进行保留时间和质谱验证。

1.4 东方绢金龟雌成虫对桃树挥发物的 GC-EAD 反应

测定所用的设备和技术参考 Chen 等（2019）。气相色谱柱为 DB-WAX 毛细管柱（规格同上），无分流进样。起始温度 40℃，保持 2 min，以 5℃/min 升至 120℃，再以 15℃/min 升至 240℃，保持 4 min。进样口温度 230℃，检测器温度为 240℃。载气为氮气，流速为 2 mL/min。以充满导电液（750 mg/mL NaCl, 35 mg/mL KCl, 29 mg/mL $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 的水溶液）的毛细管作为电极，快速切下东方绢金龟雌成虫触角，切口端与参比电极相连，触角中间鳃瓣顶端接触记录电极。电极内用银-氯化银丝连接信号探针（EAG Combi Probe, Syntech, Kirchzarten, 德国），使用 GC-EAD 软件（GC/EAD32, version 4.4, Syntech）记录和分析数据。

每次取 3 μL 样品进行试验，至少得到 5 个成功的 GC-EAD 结果。若一种物质能引起触角强烈反应且能重复 3 次以上，则视为电生理活性物质。结合 GC-MS 结果，从而鉴定出对东方绢金龟雌成虫触角产生电生理反应的物质。

1.5 东方绢金龟雌成虫对 EAD 活性挥发物标准品的 EAG 反应

选择由 GC-EAD 和 GC-MS 所鉴定出的活性化合物（表 1），用 1 mL 正己烷作溶剂将各化合物分别

配制成浓度为 0.1，1 和 10 μg/μL 的溶液，以正己烷作为对照进行触角电位测定。

测定所用的设备和技术参考李娅娅等(2018)。触角连接方法同上述 GC-EAD 操作，使用 EAG 2000 软件(Syntech，Kirchzarten，德国)记录和分析数据。取 10 μL 待测样品，均匀地滴在 40 mm × 5 mm 滤纸条上，待溶剂挥发 15 s 后放入玻璃巴斯德管中，密闭平衡 40 s 后用于刺激触角连接。吹向触角连接的湿润空气的流速为 1 L/min。按随机方式测试样品，每次刺激时间为 0.2 s，刺激间隔为 2 min。用正己烷对照的 EAG 值校正样品的 EAG 值。

1.6　东方绢金龟雌成虫对 EAD 活性挥发物标准品的行为反应

使用表 1 中的标准品，用 1 mL 正己烷作溶剂将各化合物配制成浓度为 10 μg/μL 的溶液，以正己烷作为对照，测定东方绢金龟成虫对桃树挥发物的行为选择。

Y 型嗅觉仪生物测定装置参考李俊龙等(2019)。测试时，用移液枪吸取 10 μL 挥发物或正己烷滴在 1 cm^2 的定性滤纸上，并置于味源瓶中。通过聚四氟乙烯软管将活性炭空气过滤装置、QC-1B 型采样仪、蒸馏水加湿瓶以及 Y 型管相连，空气流速控制在 500 mL/min。每 10 头东方绢金龟雌成虫为一组，重复 5 次。每次只放 1 头东方绢金龟雌成虫进行行为选择，每头试虫观察 15 min，将进入选择臂且超过选择臂 1/2 以上并停留超过 30 s 的记为有选择，否则记为无选择。每测试一头试虫后将 Y 型管两支臂互换，并空吹 20 min，每 5 头测试完成后，将整个系统中的玻璃仪器清洗，放入烘箱，温度为 180℃，时间为 30 min。

1.7　数据分析

触角电位数据均为校正后的 EAG 反应绝对值，即将样品 EAG 测量值减去空白对照的 EAG 测量值。用 SPSS 18.0 软件进行数据分析，东方绢金龟雌成虫的 EAG 反应绝对值(平均值 ± 标准误，n = 7)采用 Tukey-HSD 检验，比较分析东方绢金龟雌成虫对不同测试样品的 EAG 反应的差异显著性；行为试验数据采用卡方检验，比较东方绢金龟雌成虫对不同挥发物行为反应的差异显著性，并通过以下公式计算选择率：

选择率(%) = 处理臂内的总虫数或对照臂内的总虫数/做出选择的总虫数 × 100%。

2　结果

2.1　东方绢金龟雌成虫对桃树挥发物的 GC-EAD 反应

GC-EAD 结果表明，有 6 种桃树挥发物成分可重复引起东方绢金龟雌成虫的 EAD 反应(图 1)，经 GC-MS 鉴定分别为反-2-己烯醛、顺-3-乙酸己烯酯、反-3-己烯醇、顺-3-己烯醇、水杨酸甲酯以及 1 种未知化合物，其相对含量见表 2。内标苯甲酸甲酯也能引起东方绢金龟雌成虫明显的 EAD 反应。

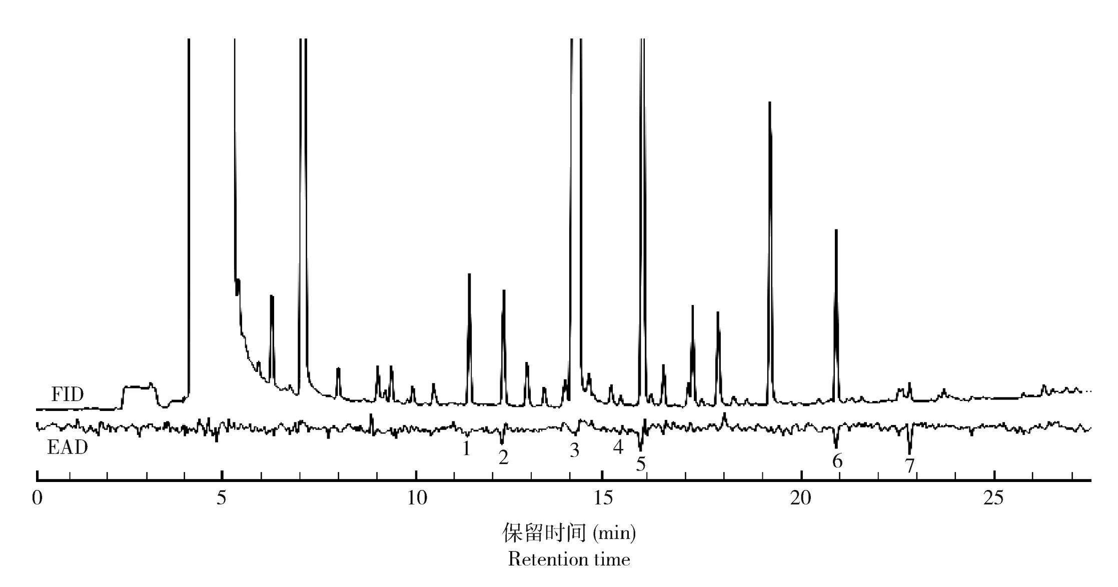


图 1　东方绢金龟雌成虫对桃树挥发物的 GC-EAD 反应

Fig. 1　GC-EAD responses of female adults of *Maladera orientalis* to volatile compounds from peach tree

1：反-2-己烯醛 *E*-2-Hexenal；2：未知化合物 Unknown compound；3：顺-3-己烯乙酸酯 *Z*-3-Hexenyl acetate；4：反-3-己烯醇 *E*-3-Hexenol；5：顺-3-己烯醇 *Z*-3-Hexenol；6：苯甲酸甲酯(内标)Methyl benzoate (internal standard)；7：水杨酸甲酯 Methyl salicylate.

表 2 桃树挥发物中 EAD 活性物质的相对含量

Table 2 Relative contents of the EAD active compounds in peach tree volatiles

序号 No.	化合物 Compounds	类别 Category	相对含量(%) Relative content	保留时间(min) Retention time
1	反-2-己烯醛 *E*-2-Hexenal	醛类 Aldehyde	5.33	11.16
2	未知 Unknown	–	4.81	12.02
3	顺-3-己烯乙酸酯 *Z*-3-Hexenyl acetate	酯类 Ester	28.56	13.89
4	反-3-己烯醇 *E*-3-Hexenol	醇类 Alcohol	1.74	15.00
5	顺-3-己烯醇 *Z*-3-Hexenol	醇类 Alcohol	13.58	15.59
6	苯甲酸甲酯(内标)Methyl benzoate (internal standard)	酯类 Ester	6.27	20.51
7	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	酯类 Ester	1.81	22.39

2.2 东方绢金龟雌成虫对 5 种桃树挥发物成分的 EAG 反应

东方绢金龟雌成虫触角在不同剂量下对 5 种桃树挥发物成分及苯甲酸甲酯都有明显的 EAG 反应。随着剂量增大,EAG 反应越强烈。当挥发物成分的剂量分别为 1 和 10 μg 时,东方绢金龟雌成虫触角对反-2-己烯醛的反应显著大于对其余 4 种挥发物成分的反应(1 μg: $P<0.0001$; 10 μg: $P<0.0001$);当挥发物成分的剂量为 100 μg 时,东方绢金龟雌成虫对反-3-己烯醇和水杨酸甲酯的反应最强烈,EAG 反应值均为 2.810 mV;对顺-3-己烯乙酸酯的反应最小,EAG 反应值约为 1.209 mV,显著低于对其余 4 种挥发物成分的反应($P<0.0001$)。

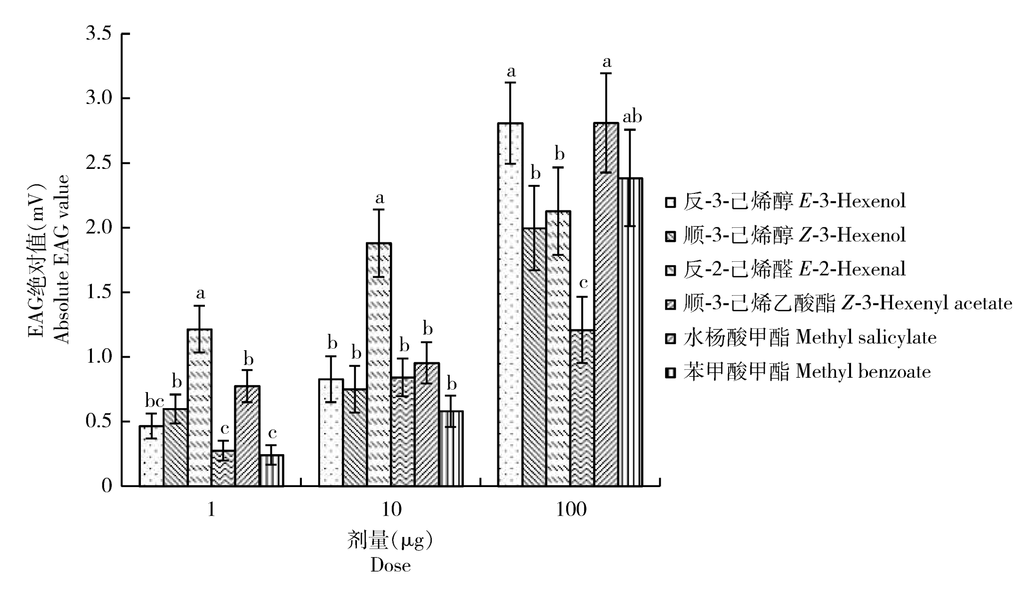


图 2 东方绢金龟雌成虫对不同剂量的桃树挥发物成分及苯甲酸甲酯的 EAG 反应

Fig. 2 EAG responses of female adults of *Maladera orientalis* to peach tree volatile compounds and methyl benzoate at different doses

图中数据为平均值 ± 标准差; 柱上不同小写字母表示同一剂量下不同化合物 EAG 反应值间差异显著($P<0.05$, Tukey-HSD 分析)。Data in the figure are mean ± *SD*. Different small letters above bars indicate statistically significant difference in EAG amplitudes to different compounds at the same dose ($P<0.05$, Tukey-HSD).

2.3 东方绢金龟雌成虫对 5 种桃树挥发物成分的行为反应

利用 Y 型嗅觉仪,分别测试了东方绢金龟雌成虫对 5 种桃树挥发物成分及苯甲酸甲酯在剂量为 100 μg 时与正己烷对照之间的选择性(图 3)。结果表明,100 μg 的反-3-己烯醇、顺-3-己烯醇和苯甲酸甲酯对东方绢金龟雌成虫都表现出显著的吸引作用,其中选择反应率最高的是顺-3-己烯醇和苯甲酸甲酯,均为 64%;其余 3 种桃树挥发物样品对东方绢金龟雌成虫没有表现出显著的吸引或驱避作用。

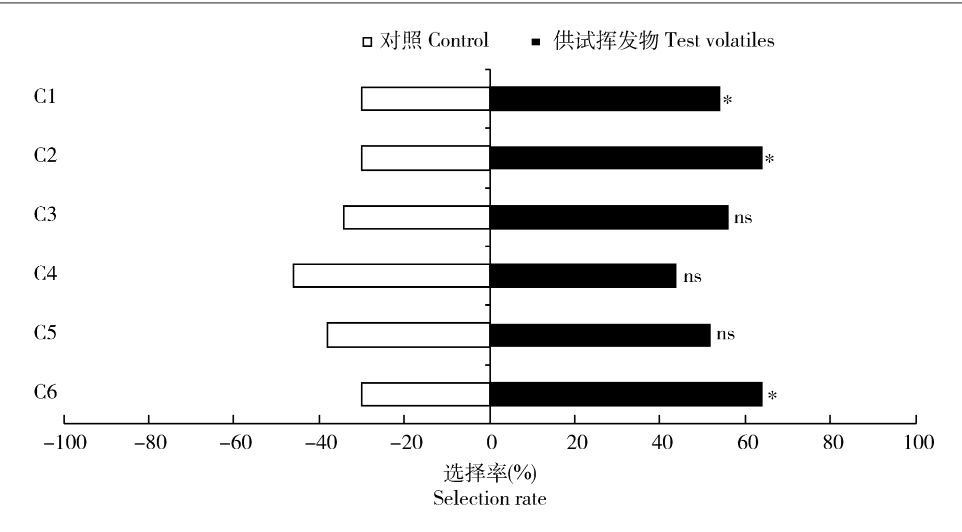


图 3　东方绢金龟雌成虫对桃树挥发物成分及苯甲酸甲酯(100 μg)的行为反应

Fig. 3　Behavioral responses of female adults of *Maladera orientalis* to peach tree volatile compounds and methyl benzoate at the dose of 100 μg

对照为正己烷；化合物编号 C1－C6 见表 1。数据统计采用卡方检验，星号表示在 0.05 水平下处理和对照间存在显著差异，ns 表示不存在显著性差异。Hexane was used as the control. The compound no. C1－C6 is listed in Table 1. The *Chi*-square test was used for data analysis. Asterisk indicates significant difference between the treatment and the control, while ns indicates no significant difference ($\alpha = 0.05$).

3　讨论

本研究鉴定了在东方绢金龟寄主定位中发挥作用的桃树挥发物成分。首先，利用 GC-EAD 和 GC-MS 技术鉴定出了 6 种有 EAD 活性的桃树挥发物成分，包括醛类、醇类和酯类及 1 种未知化合物，其中酯类含量最高，约占 30%。其次，测试了东方绢金龟雌成虫触角对不同剂量挥发物成分的 EAG 反应，结果表明随着测试的挥发物成分剂量升高 EAG 反应值增大。最后，通过行为生测试验发现反-3-己烯醇和顺-3-己烯醇对东方绢金龟雌成虫具有显著的吸引作用。

这几种植物挥发物对其他金龟甲的吸引作用已有报道。例如，顺-3-己烯醇对庭园发丽金龟 *Phyllopertha horticola* 有强烈的吸引作用(Ruther *et al*., 2002)。反-3-己烯醇、顺-3-己烯醇都能在一定程度上引诱五月鳃金龟 *Melolontha melolontha* (Reinecke *et al*., 2005)。东方绢金龟与铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* 都对水杨酸甲酯有显著的电生理反应(鞠倩等, 2016)，这可能与它们取食相同的寄主植物有关。孙凡等(2006)研究发现，反-2-己烯醛能引起东北大黑鳃金龟 *Holotrichia oblita* 雌、雄成虫显著的 EAG 反应，且行为测试显示反-2-己烯醛对该成虫具有吸引作用。但是在复杂的自然环境中，各种挥发物都不是单独存在的，昆虫定位寄主植物不仅依靠单个物质，因此将不同化合物按一定的比例混合，可能会增强它们的引诱力(Ladd and McGovern, 1980; Paul *et al*., 2009)。本研究鉴定出的活性物质对东方绢金龟的最佳引诱比例还有待进一步研究。

昆虫对具有 EAD 活性物质的电生理和行为反应与其相对含量不一定呈正相关。玉米果穗挥发物中含量较低的顺-3-己烯醇和含量较高的(+)-环苜蓿烯、β-石竹烯均对未交配亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 成虫有引诱作用(蒋兴川等, 2018)。本研究鉴定的具有 EAD 活性物质中，顺-3-己烯乙酸酯的相对含量最高，约为 28%，但其引起的试虫 EAG 反应值较小且对东方绢金龟雌成虫无显著的吸引作用；相反，相对含量较低的顺-3-己烯醇和反-3-己烯醇却对东方绢金龟雌成虫有明显的吸引力(表 2；图 2)，这表明低含量物质可能在其寄主定位中发挥关键的作用。

昆虫对某些刺激物的 EAG 反应程度与行为反应相一致，但对另外一些刺激物，两种反应则可能表现为不相关甚至负相关(郭线茹等, 2003; 张振等, 2010)。如绿叶气味中的反-2-己烯醛和 5-甲基-1-己醇都能引起东北大黑鳃金龟成虫较强的 EAG 反应，但反-2-己烯醛对成虫具有定向作用，而 5-甲基-1-己醇对成虫无显著的行为作用(孙凡等, 2006)。在本研究中，东方绢金龟雌成虫对水杨酸甲酯有较高的 EAG 反应，但趋向行为反应不显著(图 2 和 3)。这

表明 EAG 反应只是昆虫触角对外界气味刺激的感受,不能代表行为反应。

不同性别的同种昆虫对气味的敏感性存在差异,在寻找寄主、繁殖后代等行为中所采用的策略不同。例如绿盲蝽 *Lygus lucorum* 雄虫利用雌虫产生的性信息素搜索、定位雌虫,对性信息素类似物更敏感;而雌虫对植物挥发物更敏感,有利于寻找适宜产卵的寄主(陈展册等, 2010)。华北大黑鳃金龟雌虫对柿树、金银木、榆树挥发物的 EAG 反应均显著大于雄虫(李娅娅等, 2018)。故本试验选取东方绢金龟雌成虫作为研究对象。综上所述,反-3-己烯醇和顺-3-己烯醇对东方绢金龟雌成虫表现出显著的吸引作用,说明东方绢金龟很可能是利用这几种物质来定位桃树。本研究为开发安全、高效的植物源引诱剂奠定了基础,同时为其他金龟甲的绿色防控提供了技术参考。反-3-己烯醇和顺-3-己烯醇对东方绢金龟的引诱作用,还需进行田间试验进一步验证和筛选。

参考文献 (References)

Bai WH, 1981. *Serica orientalis* and its control. *Grassland China*, (1): 58–59. [白文辉, 1981. 黑绒金龟子及其防治. 中国草原, (1): 58–59]

Chen B, Chen L, 2016. Damage of *Maladera orientalis* on corn and its control measures. *Jilin Agric.*, (23): 104. [陈博, 陈磊, 2016. 黑绒金龟子在玉米上的危害及防治方法. 吉林农业, (23): 104]

Chen L, Li YY, Shao KM, 2019. A practical technique for electrophysiologically recording from lamellated antenna of scarab beetle. *J. Chem. Ecol.*, 45(4): 392–401.

Chen ZC, Su L, Ge F, Su JW, 2010. Electroantennogram responses of the green leaf bug, *Lygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae), to sex pheromone analogs and plant volatiles. *Acta Entomol. Sin.*, 53(1): 47–54. [陈展册, 苏丽, 戈峰, 苏建伟, 2010. 绿盲蝽对性信息素类似物和植物挥发物的触角电位反应. 昆虫学报, 53(1): 47–54]

Gong HL, Xu HL, Sun DL, Guan CX, Lin MJ, An YX, 2013. Research status and application of semiochemicals in scarab. *Guangdong Agric. Sci.*, 40(20): 81–85. [龚恒亮, 许汉亮, 孙东磊, 管楚雄, 林明江, 安玉兴, 2013. 金龟甲诱剂的研究与应用状况. 广东农业科学, 40(20): 81–85]

Guo XR, Yuan GH, Jiang JW, Ma JS, 2003. Electroantennogram responses of insects to volatile secondary compounds from plants. *J. Henan Agric. Univ.*, 37(1): 18–22. [郭线茹, 原国辉, 蒋金炜, 马继盛, 2003. 植物挥发性次生物质对昆虫触角电位反应的影响. 河南农业大学学报, 37(1): 18–22]

Han GJ, Zhang WZ, Han GH, Li XZ, Chen CJ, 2002. Study on biological characteristics of *Maladera orientalis*. *J. Jilin For. Sci. Technol.*, 31(6): 15–25. [韩国君, 张文忠, 韩国辉, 李学智, 陈长杰, 2002. 黑绒鳃金龟生物学特性研究. 吉林林业科技, 31(6): 15–25]

He DH, Hong B, Tian Z, Chang YD, Li QX, Song YH, Yang ZQ, Han JJ, 2000. Studies on the ecological succession of soil insect and the serial changes of population for the dominant pest insect in the desert reclamation area of Ningxia. *J. Ningxia Agric. Coll.*, 21(3): 5–10. [贺达汉, 洪波, 田真, 长有德, 李秋霞, 宋永红, 杨子强, 韩吉军, 2000. 宁夏新垦区土壤昆虫生态演替及优势种种群序列演变的研究. 宁夏农学院学报, 21(3): 5–10]

He XH, 2004. Comprehensive control techniques of *Maladera orientalis* in orchard. *Shanxi Fruits*, (4): 45. [贺晓红, 2004. 果园黑绒金龟子的综合防治技术. 山西果树, (4): 45]

Hu CL, Li L, 2002. Occurrence and control of *Maladera orientalis*. *Hebei Fruits*, (2): 52–53. [胡长林, 李莉, 2002. 黑绒金龟子发生与防治. 河北果树, (2): 52–53]

Hun ZY, Zhang ZX, 1992. Study on occurrence and control techniques of scarab beetles on fruit seedlings in Cangzhou area. *J. Hebei Agric. Sci.*, (2): 14–18. [浑志英, 张之新, 1992. 沧州地区果园幼树金龟子发生规律及防治技术研究. 河北农业科学, (2): 14–18]

Jiang XC, Xie XW, Sun YQ, Dong WX, Li XY, Cao HQ, Li ZY, 2018. The adult orientated behavior response of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* to corn ear volatile. *J. Environ. Entomol.*, 40(4): 873–879. [蒋兴川, 谢兴伟, 孙郁晴, 董文霞, 李昕央, 操海群, 李正跃, 2018. 亚洲玉米螟对玉米果穗挥发物的定向行为反应. 环境昆虫学报, 40(4): 873–879]

Ju Q, Guo XQ, Li X, Jiang XG, Ni WL, Qu MJ, 2016. EAG and behavioral responses of copper-green chafer *Anomala corpulenta* Motschulsky (Coleoptera: Rutelidae). *Acta Phytophy. Sin.*, 43(2): 281–287. [鞠倩, 郭晓强, 李晓, 蒋相国, 倪婉莉, 曲明静, 2016. 铜绿丽金龟对寄主植物挥发物的触角电生理及行为反应. 植物保护学报, 43(2): 281–287]

Knolhoff LM, Heckel DG, 2014. Behavioral assays for studies of host plant choice and adaptation in herbivorous insects. *Annu. Rev. Entomol.*, 59: 263–278.

Ladd TL, McGovern TP, 1980. Japanese beetle: a superior attractant phenethylpropionate + eugenol + geraniol 3∶7∶3. *J. Econ. Entomol.*, 73(5): 689–691.

Leal WS, 1998. Chemical ecology of phytophagous scarab beetles. *Annu. Rev. Entomol.*, 43: 39–61.

Leal WS, Hasegawa M, Sawada M, Ono M, Ueda Y, 1994. Identification and field evaluation of *Anomala octiescostata* (Coleoptera: Scarabaeidae) sex pheromone. *J. Chem. Ecol.*, 20(7): 1643–1655.

Li JL, Chen L, Liu CM, 2019. Olfactory and behavioral responses of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) workers to cotton volatiles induced by cotton aphids. *Acta Entomol. Sin.*, 62(5): 594–601. [李俊龙, 陈立, 刘长明, 2019. 红火蚁工蚁对棉蚜诱导的棉花挥发物的嗅觉和行为反应. 昆虫学报, 62(5): 594–601]

Li WZ, Yang L, Shen XW, Yuan YH, Yuan GH, Luo MH, Guo XR,

2013. Prescription screening and field evaluation of broad spectrum attractants of scarab beetles from *Ricinus communis*. *Chin. J. Eco-Agric*., 21(4): 480 – 486. [李为争，杨雷，申小卫，袁萤华，原国辉，罗梅浩，郭线茹，2013. 金龟甲蓖麻源引诱剂的配方筛选及田间效果评价. 中国生态农业学报，21(4): 480 – 486]

Li YY, Chen L, Wei HY, 2018. Host preference and EAG response of 4 scarab beetles to head space volatiles of host and non-host plants. *J. Environ. Entomol*., 40(6): 1328 – 1334. [李娅娅，陈立，魏洪义，2018. 4 种金龟甲的寄主偏好性及对不同植物挥发物的 EAG 反应. 环境昆虫学报，40(6): 1328 – 1334]

Li ZX, Liu CQ, Wang QL, Cui JY, 1995. Effect of attractants on scarabs. *Acta Agric. Bor.-Sin*., 10(Suppl.): 153 – 156. [李仲秀，刘春芹，王庆雷，崔景岳，1995. 诱集物对金龟子诱集作用. 华北农学报，10(增刊): 153 – 156]

Liu GR, Zhang YW, Wang R, 1997. Colored Illustration of Common Chinese Scarab Beetles in North China. China Forestry Press, Beijing. 80 – 81. [刘广瑞，章有为，王瑞，1997. 中国北方常见金龟子彩色图鉴. 北京：中国林业出版社. 80 – 81]

Ma QZ, Wang J, Li JT, Li ZH, 2009. Damage of *Maladera orientalis* on sweet cherries and its control measures. *Fruit Grow. Friend*, (12): 34. [马庆州，王俊，李金涛，李中华，2009. 黑绒金龟子在甜樱桃上的危害及防治方法. 果农之友，(12): 34]

Oliveira LJ, Garcia MA, Hoffmann-Campo CB, Amaral MLBD, 2007. Feeding and oviposition preference of *Phyllophaga cuyabana* (Moser) (Coleoptera: Melolonthidae) on several crops. *Neotrop. Entomol*., 36(5): 759 – 764.

Paul VS, Patrick CE, Carissa AS, 2009. Behavioral explanations underlying the lack of trap effectiveness for small-scale management of Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae). *J. Econ. Entomol*., 102(3): 934 – 940.

Qiao ZW, Fan JS, Zhang LX, 2014. Study review of *Serica orientalis* Motschulsky. *J. Agric*., 4(12): 48 – 51. [乔志文，范锦胜，张李香，2014. 黑绒金龟子研究进展. 农学学报，4(12): 48 – 51]

Reinecke A, Ruther J, Hilker M, 2005. Electrophysiological and behavioural responses of *Melolontha melolontha* to saturated and unsaturated aliphatic alcohols. *Entomol. Exp. Appl*., 115(1): 33 – 40.

Ruther J, Reinecke A, Hilker M, 2002. Plant volatiles in the sexual communication of *Melolontha hippocastani*: response towards time dependent bouquets and novel function of (*Z*)-3-hexen-1-ol as a sexual kairomone. *Ecol. Entomol*., 27(1): 76 – 83.

Shi ES, Luo Q, Li N, Yu MY, 2014. Occurrence and control measures of *Maladera orientalis*. *Mod. Rural Sci. Technol*., (14): 33. [师二帅，罗琼，李娜，于明洋，2014. 黑绒金龟子发生规律与防治措施. 现代农村科技，(14): 33]

Sun F, He WC, Wang GL, Li L, Gong ZG, Liu D, Bao GY, 2006. Electroantennogram and behavioral responses of *Holotrichia oblita* Faldemann to odors from green leaves. *J. Northeast For. Univ*., 34(5): 7 – 9. [孙凡，何万存，王广利，李玲，龚镇国，刘涤，鲍广源，2006. 东北大黑鳃金龟对绿叶气味的触角电位及行为反应. 东北林业大学学报，34(5): 7 – 9]

Sun RH, Li AH, Li XJ, Zhang Y, Qu JL, 2008. Preliminary study on the control of *Maladera orientalis* using pathogenic nematode TSI. *Decid. Fruits*, (3): 6 – 7. [孙瑞红，李爱华，李晓军，张勇，曲健禄，2008. 利用病原线虫 TSI 防治黑绒金龟子初报. 落叶果树，(3): 6 – 7]

Sun XL, Wang GC, Gao Y, Zhang XZ, Xin ZJ, Chen ZM, 2014. Volatiles emitted from tea plants infested by *Ectropis obliqua* larvae are attractive to conspecific moths. *J. Chem. Ecol*., 40(10): 1080 – 1089.

Teng XH, Gao XG, Gong DF, Zhang HF, Yan FM, Guo XR, Li WZ, Yuan GH, 2017. Field screening and evaluation of broad-spectrum attractants of scarab beetles. *Chin. J. Appl. Entomol*., 54(5): 859 – 864. [滕小慧，高新国，龚东风，张鸿飞，闫凤鸣，郭线茹，李为争，原国辉，2017. 金龟甲广谱引诱剂配方筛选及田间评价. 应用昆虫学报，54(5): 859 – 864]

Wang GL, Sun F, 2005. Semiochemicals in phytophagous scarab beetles. *Acta Entomol. Sin*., 48(5): 785 – 791. [王广利，孙凡，2005. 植食性金龟子信息化学物质的研究. 昆虫学报，48(5): 785 – 791]

Xu YG, Sun JS, 2012. Occurrence of *Maladera orientalis* and its control in *Schisandra chinensis* garden. *Special Econ. Animal Plant*, (6): 52 – 53. [许玉国，孙久胜，2012. 五味子园中黑绒金龟子的发生规律及防治. 特种经济动植物，(6): 52 – 53]

Zhang Z, Chi DF, Yu J, Li XC, Zhao XJ, 2010. EAG and behavioral responses of *Xylotrechus rusticus* to thirteen plant volatiles. *Sci. Silv. Sin*., 46(10): 69 – 75. [张振，迟德富，宇佳，李晓灿，赵晓杰，2010. 青杨脊虎天牛对 13 种植物挥发物的电生理及行为反应. 林业科学，46(10): 69 – 75]

Zhou XW, Ding GZ, 2012. Control measures and suggestions for beet *Maladera orientalis* in 2012. *Sugar Crops China*, (2): 81 – 82. [周兴武，丁广洲，2012. 2012 年甜菜黑绒金龟子的防治对策与建议. 中国糖料，(2): 81 – 82]

（责任编辑：赵利辉）